

РАСЧЕТ ТЕНЗОРА СЕЙСМИЧЕСКОГО МОМЕНТА СЛАБЫХ КАМЧАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Павлов В.М., Абубакиров И.Р.

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Петропавловск-Камчатский

e-mail: pvm@emsd.ru

Введение

В последние десятилетия отчетливо проявляется мировая тенденция использовать в качестве основной характеристики очагов землетрясений тензор сейсмического момента (ТСМ). ТСМ – объект, заключающий в себе характеристики очага в целом: а) его геометрию – ориентацию плоскости очага и направление подвижки (механизм) и б) его «силу» – скалярный сейсмический момент M_0 , по которому рассчитывается моментная магнитуда M_w [7]:

$$M_w = (2/3) \cdot (\lg M_0 [\text{Н} \cdot \text{м}] - 9.1). \quad (1)$$

Для сильных камчатских землетрясений последних лет ТСМ и моментные магнитуды M_w приведены в глобальном каталоге GCMT (Global Centroid Moment Tensor), где для Камчатки нижний порог определения магнитуды составляет около $M_w = 4.9$.

Однако, в настоящее время опорной для регионального каталога [2] умеренных и слабых землетрясений Камчатки и Командорских островов являются магнитуда M_L , полученная пересчетом из энергетического класса $K_S = K_{S1,2}^{\phi 68}$, а механизмы рассчитываются по знакам первых вступлений объемных волн [1].

Развернутая в 2006–2010 гг. на Камчатке сеть цифровых приборов позволила получать оценки ТСМ по данным региональной сети с помощью широкополосных записей велосиграфов на основе методики, разработанной в Камчатском филиале Единой Геофизической Службы (КФ ЕГС). В статье [4] эта методика применена для сильных землетрясений. В данной работе методика адаптируется для землетрясений умеренной силы и слабых землетрясений Камчатки. Это позволяет понизить порог определения моментной магнитуды для Камчатки до $M_w = 3.5$, и делает возможным получение связи M_L и M_w для умеренных и слабых камчатских землетрясений. Наличие такой связи позволяет давать оценку для M_w для землетрясений прошлых лет.

Обработано 149 землетрясений в диапазоне $K_S = 9.5-15.7$ ($M_w = 3.5-7.2$), произошедших вблизи восточного побережья Камчатки в 2010-2014 гг. Для 56 землетрясений имеются оценки из каталога GCMT. Проведено сравнение этих оценок с оценками, полученными в данной работе.

Методика

Определение ТСМ по сейсмическим данным производится на основе инверсии широкополосных волновых форм с использованием синтетических сейсмограмм. Для относительно сильных землетрясений в рамках проекта GCMT (“The Global CMT Project”) ТСМ определяется одновременно с пространственно-временным центроидом [5,6] – векторной величиной, компонентами которой являются время в очаге и координаты эквивалентного точечного источника. Значения ТСМ и центроида определяются по критерию наилучшего согласия между наблюдаемыми и синтезированными сейсмограммами – минимума невязки. Расчеты по этой методике публикуются близко к реальному времени в глобальном каталоге тензора момента центроида на сайте проекта (<http://www.globalcmt.org/>).

Методика, разработанная в КФ ЕГС [4] – аналог GCMT, характеризующийся следующими отличиями: 1) модель земли – плоскостное полупространство, а не шар; 2) из характеристик центроида определяется только глубина; эпицентр не разыскивается – его положение принимается по каталогу; 3) время в очаге не определяется – перед началом инверсии синтетические и наблюдаемые сейсмограммы совмещаются по вступлению продольных волн. Кроме того, в отличие от GCMT длительность процесса в очаге τ не назначается по корреляционной зависимости (τ, M_w), а рассчитывается перебором по критерию минимума невязки. Будем ссылаться на эту методику с помощью аббревиатуры RSMT (Regional seismic Moment Tensor – региональный тензор сейсмического момента).

Возможности региональной цифровой сети, установленной в 2006–2010 гг., в некоторых случаях, позволяют рассчитывать тензоры $\mathbf{M}_{\text{RSMT}}$ не только для сильных землетрясений, для которых имеются GCMT-решения, но и для умеренных и слабых землетрясений с $M_w = 3.5 \div 5.0$, для GCMT-решения отсутствуют.

Подготовка сейсмограмм для инверсии по методике включает: восстановление истинных смещений грунта и расчет радиальной и поперечной компонент. Положение эпицентра фиксируется по данным каталога. Далее путем перебора ищется оптимальный вариант для двух параметров: глубины и очаговой длительности. Необходимость подбора длительности связана с тем, что при анализе сильных землетрясений конечная длительность временной функции очага заметно влияет на форму синтетических сейсмограмм. Для слабых землетрясений длительность не варьировали, полагая ее равной 2 с. При фиксированных глубине и длительности проводится инверсия выделенных участков широкополосных сейсмограмм смещений с помощью синтетических сейсмограмм [3] – откликов на элементарные источники, соответствующие конкретным компонентам TCM. Как реальные, так и синтетические смещения перед инверсией пропускаются через полосовой фильтр Баттерворта 4-го порядка. Полоса периодов фильтра составляла либо 16–25 с, либо 20–50 с в зависимости от того, в какой из них выше отношение сигнал/шум, при этом предпочтительным являлся более низкочастотный диапазон. Оптимальный вариант выбирается по значению минимума остаточной невязки ε , который указывает на наилучшее согласие между реальными и синтетическими смещениями. Такого рода методика реализована в интерактивном режиме. В результате получали тензор $M_{ij} = M_0 \cdot m_{ij}$, где M_0 – искомый скалярный сейсмический момент, а единичный тензор m_{ij} задает механизм очага. Полученное значение M_0 пересчитывается в M_w по формуле (1).

Качество подгонки отражено в значении ε , выраженном в процентах: чем меньше ε , тем качественнее подгонка. Кроме того, о степени устойчивости решения можно судить по тому как оно меняется с глубиной – плавность изменения (совокупно с малостью ε) свидетельствует о «хорошей» устойчивости.

Для получения содержательного представления о вариабельности значений параметров, связанных с TCM, была применена следующая процедура. Значение оптимальной остаточной невязки ε_o , т.е. невязки, соответствующей наилучшему варианту TCM, увеличивается на некоторую величину ε_a и рассматривается множество допустимых TCM, для которых остаточная невязка ε удовлетворяет неравенству

$$\varepsilon \leq \varepsilon_o + \varepsilon_a \quad (2)$$

Погрешность значения параметра, связанного с TCM (M_0 , M_w , глубина h и т.п), определяется по разбросу значений этого параметра в пределах множества TCM, удовлетворяющих (2).

Нижний порог определения $M_w = M_w^{\text{GCMT}}$ в методике GCMT составляет $M_w \approx 4.9$ (рис. 4), а в методике RSMT аналогичный порог для M_w^{RSMT} составляет $M_w \approx 3.5$ (рис. 5). Это связано с ухудшением отношения сигнал/шум на низких частотах при снижении магнитуды. Выигрыш для RSMT – за счет использования региональных волновых форм.

Исходные данные

В методике GCMT с 1988 года используются данные глобальной сейсмической сети GSN (“Global Seismic Network”), включающей в себя более 150 станций. Методика RSMT опирается на региональные данные, а именно, волновые формы камчатской сети цифровых широкополосных сейсмических станций. Для оценки TCM была сформирована коллекция записей землетрясений – велосиграм, которая включает события 2011–2012 гг., в основном из района 50.0° – 56.0° с. ш., 157.0° – 162.0° в. д. с $K_{S1,2}^{\Phi 68} = 9.5$ – 15.7 . Были обработаны записи 149 землетрясений. Эпицентры – на рис. 1а.

Результаты

Расчеты проводились по двум вариантам исходных условий, касающихся модели источника: (а) TCM с нулевым следом и (б) TCM типа «двойной диполь без момента». В каждом из вариантов были рассчитаны: оптимальные глубина гипоцентра и длительность процесса (последняя для достаточно сильных), оптимальный TCM и остаточная невязка. В первом варианте для оптимального

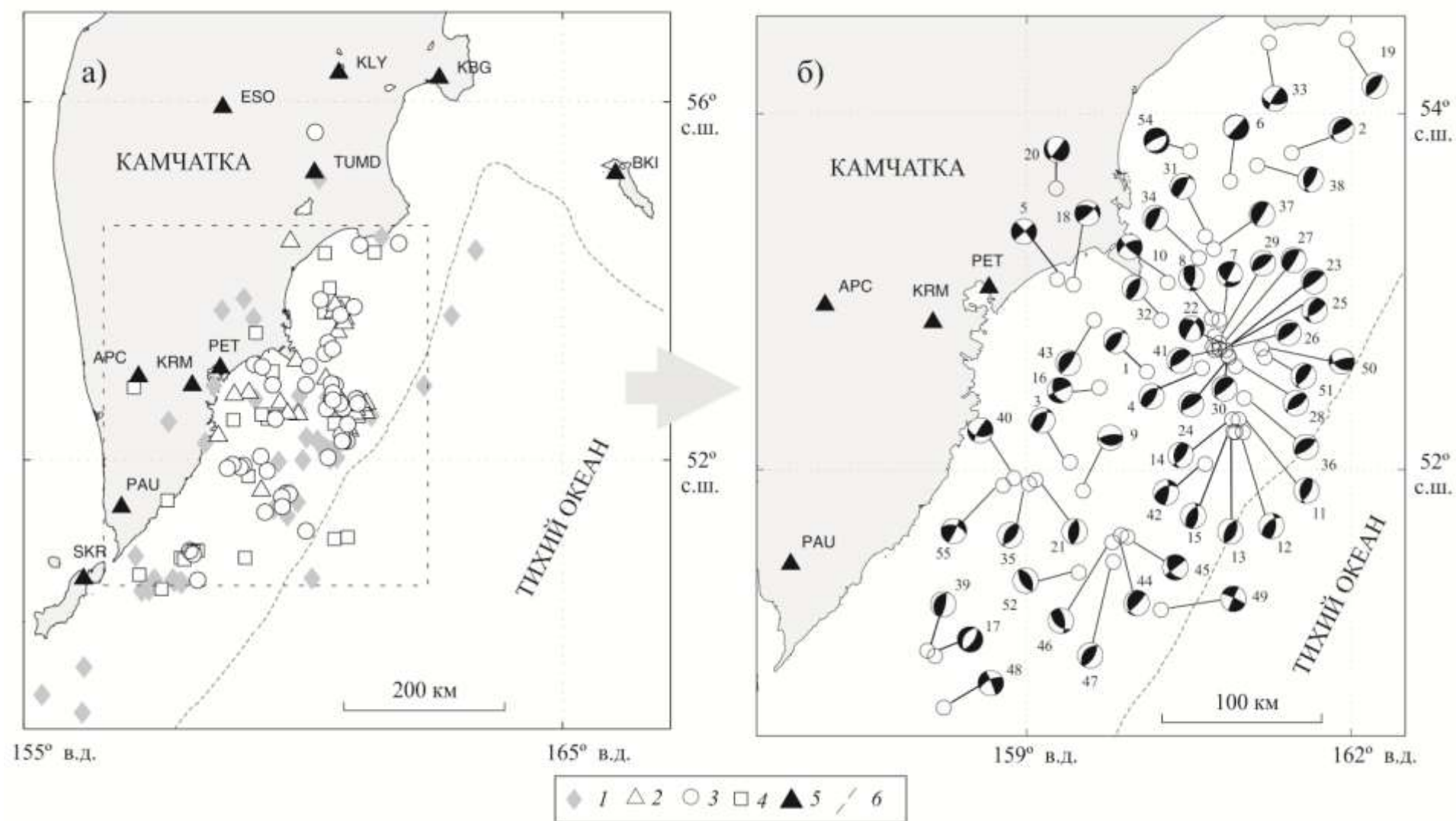


Рис.1. Эпицентры обработанных землетрясений 2010-2014 гг. (а) и механизмы слабых землетрясений 2012 г. (б). 1 – эпицентры событий, для которых имеются как глобальные GCMT, так и локальные RSMT TCM оценки; 2 – эпицентры слабых событий 2011 г.; 3 – эпицентры слабых событий 2012 г.; 4 – эпицентры слабых событий 2011-2012 г., для которых удалось получить устойчивые оценки только для M_w ; 5 – сейсмостанции; 6 – глубоководный желоб.

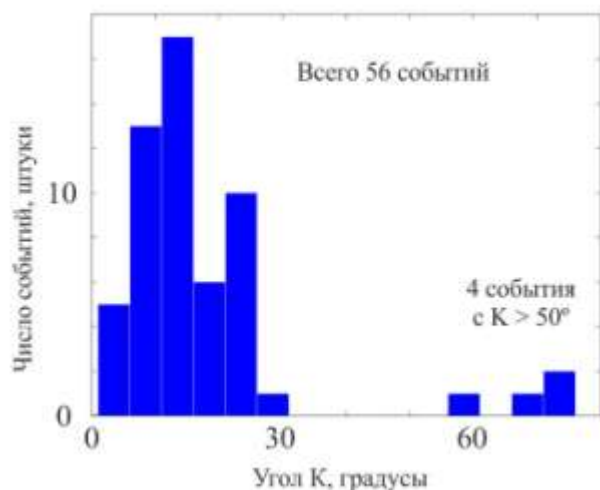


Рис. 2. Гистограмма угла К – наименьшего угла, на который нужно повернуть оси механизма RSMT до совмещения с соответствующими осями механизма GCMT.

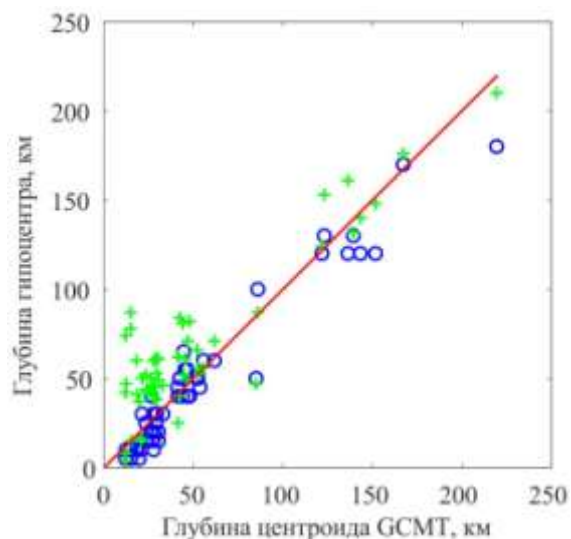


Рис. 3. Сопоставление глубин по разным каталогам. По оси абсцисс – глубины из каталога GCMT. По оси ординат – глубины по каталогам КФ ФИЦ ЕГС РАН (+) и RSMT (o).

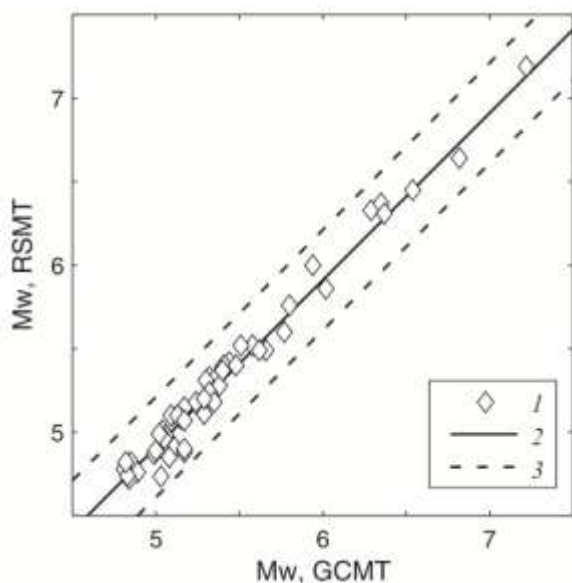


Рис. 4. Оценки M_w^{RSMT} в сравнении с оценками M_w^{GCMT} . 1 – точки с координатами (M_w^{GCMT}, M_w^{RSMT}) ; 2 – линия регрессии L с углом 45° – диагональ, сдвинутая вниз на 0.09 единиц магнитуды; ср.кв. откл. 0.08. 3 – линии, получающиеся сдвигом L на ± 0.3 .

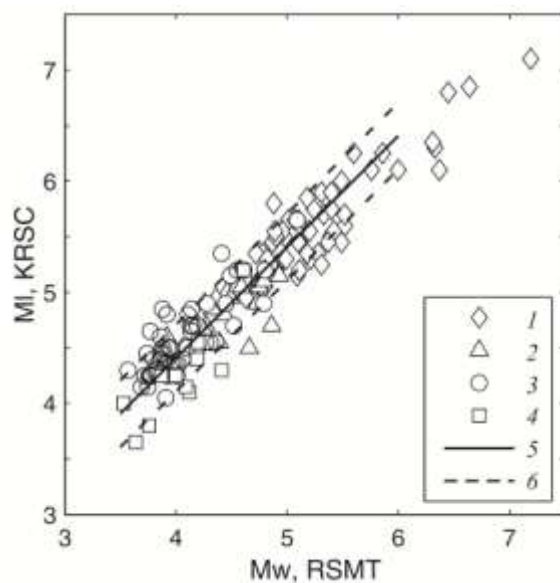


Рис. 5. Магнитуда MI и моментная магнитуда M_w^{RSMT} . 1-4 – то же, что и на рисунке 1; 5 – линия регрессии L с углом 45° – диагональ, сдвинутая вверх на 0.41 ед.; ср.кв. откл. 0.22. 6 – линии L со сдвигом на ± 0.3 . При регрессии данные с $M_w^{RSMT} > 6$ не включались.

ТСМ рассчитывались главные значения M_i ($i=1,2,3$; упорядочены по возрастанию) и единичные векторы главных осей $\mathbf{v}_i$ (векторы-столбцы). По ним – ближайший двойной диполь без момента

$$\mathbf{M}_{DC} = M_0(\mathbf{v}_1 \mathbf{v}_1^T - \mathbf{v}_3 \mathbf{v}_3^T), \quad (3)$$

где

$$M_0 = (M_3 - M_1)/2 \quad (4)$$

– оценка скалярного сейсмического момента. Кроме того, рассчитывался параметр Лоде-Надаи

$$\eta = \frac{2 M_2}{3 M_0}, \quad (5)$$

значение которого характеризует отклонение ТСМ от типа «двойной диполь без момента».

Во втором варианте, в результате нелинейной инверсии, непосредственно находились компоненты ТСМ вида (2). Здесь мы приводим результаты по варианту (б). При оценке вариабельности решений для величины ε_a из формулы (2) приняли значение 5%.

Для проверки работоспособности процедуры оценки ТСМ и других параметров очага была составлена коллекция широкополосных записей землетрясений, имеющих GCMT-решения (эпицентры на рис. 1а отмечены ромбами). Для этих землетрясений были найдены RSMT-решения, которые были сопоставлены с GCMT. Различие между механизмами выражалось величиной угла К (рис. 2). Оказалось, что из 56 землетрясений 52 имеют различие по углу К в пределах 30°. Детальное рассмотрение результатов для 4-х событий с $K > 50^\circ$ показало, что для одного из них число станций равно 2, причем азимутальный сектор, в котором лежат эти станции имеет угол 11°, поэтому результат в отношении механизма этого события нельзя признать надежным. Однако оценку моментной магнитуды M_w сочли приемлемой, основываясь на малом значении остаточной невязки (38%). Для трех остальных близких к GCMT механизм удовлетворяет условию (2). При этом он относится к несколько другой глубине отличной от оптимальной. С учетом этого, приходим к выводу, что для этих событий решение в отношении механизма не является единственным: с учетом условия (2) имеются существенно различные механизмы.

Как показывает Рис. 3 оценки глубин h по RSMT-процедуре близки к оценкам h по GCMT-каталогу, но несколько занижены при $h \leq 50$ км. Глубины по КФ ФИЦ ЕГС каталогу существенно выше глубин каталога GCMT в этом диапазоне, но неплохо согласуются при $h > 50$ км.

На рисунке 1б показаны диаграммы механизмов 55 землетрясений, произошедших в 2012 г. На Рис. 4 приведено сравнение значений моментной магнитуды M_w из каталога GCMT и определенных по нашей методике для 56 землетрясений. Различие в среднем составляет менее 0.1 единицы. На Рис. 5 представлены значения локальной магнитуды M_l в сопоставлении со значениями M_w^{RSMT} . В диапазоне магнитуд $M_l = 4.0-6.4$ ($M_w=3.6-6.0$) для ориентировочной оценки можно применять формулу

$$M_w = M_l - 0.4 \quad (6)$$

Заключение

В работе приведены результаты оценки механизмов и моментных магнитуд подборки слабых и умеренных землетрясений вблизи восточного побережья Камчатки в 2010-2014 гг. Для части землетрясений, имеющих GCMT-решения проведено сопоставление оценок глубин, моментных магнитуд и механизмов. Получена связь местной магнитуды M_l с моментной магнитудой M_w .

Список литературы

1. Иванова Е.И., Ландер А.В., Токарев А.В., Чеброва А.Ю., Шевченко С.А. Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов за период 1980-2007 гг. // Труды конференции. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский. 2011. С. 74-79.
2. Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН. Единая информационная система сейсмологических данных. URL: <http://www.emsd.ru/sdis> (дата обращения: 27.08.2017).
3. Павлов В.М. Алгоритм расчета синтетических сейсмограмм в слоистом полупространстве с применением матричного импеданса // Физика Земли. 2013. № 1. С. 26-35.
4. Павлов В.М., Абубакиров И.Р. Алгоритм расчета тензора сейсмического момента сильных землетрясений по региональным широкополосным сейсмограммам объемных волн // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2(20). С. 149–158.
5. Dziewonski, A. M., T.-A. Chou and J. H. Woodhouse, Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, J. Geophys. Res., 86, 2825-2852, 1981. doi:10.1029/JB086iB04p02825.
6. Ekström, G., M. Nettles, and A. M. Dziewonski, The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // Phys. Earth Planet. Inter., V. 200-201, P. 1-9, 2012. doi:10.1016/j.pepi.2012.04.002.
7. Kanamori H. The energy release in great earthquakes // Journal of Geophysical Research. 1977. V. 82. № 20. P. 2981–2987.